УДК 681.5.09

В.В. НАРОЖНЫЙ, С.Н. ФИРСОВ, И.В. ЛАВОШНИК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОБЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СИГНАЛЬНЫМИ ПОДСТРОЙКАМИ

При помощи метода сигнальных подстроек, алгоритмы которого были синтезированы дискретным аналогом второго метода Ляпунова, обеспечивается восстановление работоспособности системы управления микробеспилотного летательного аппарата. Это позволяет обеспечить отказоустойчивость системы с заданным качеством по отношению к компенсируемым отказам из заданного множества.

восстановление, отказ, отказоустойчивость, система управления, метод сигнальных подстроек, диагностическая модель, устойчивость, критерий качества, компенсирование, микробеспилотный летательный аппарат

Введение

Процесс совершенствования функциональных возможностей техники неразрывно связан с повышением обеспечения ее надежности и безопасности. Недостаточная надежность отдельных комплектующих и узлов приводит к невыполнению важных заданий, созданию аварийных ситуаций. Одним из перспективных направлений парирования отказов является системный подход обеспечения отказоустойчивости систем управления [1]. В основе этого метода лежит использование принципа самоорганизации и комплексного применения арсенала разнообразных способов сохранения работоспособности системы при отказах функциональных элементов. Системный подход предусматривает декомпозировать процесс обеспечения отказоустойчивости на два этапа: глубокое диагностирование и гибкое восстановление, и перейти от пассивной формы обеспечения отказоустойчивости к активной.

Восстановление работоспособности систем управления

Одним из ключевых этапов обеспечения активной отказоустойчивости является восстановление работоспособности – процесс перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное. Восстановление работоспособности элементов системы управления (СУ) микробеспилотных летательных аппаратах (МБПЛА) путем их замены невозможно в реальных условиях полета. Поэтому актуальной задачей является восстановление работоспособности СУ МБПЛА, элементы которого находятся в состоянии отказа. Восстановление происходит за счет использования дополнительных, заложенных при проектировании, гибко управляемых средств, которые представляют собой: аппаратную, информационную, функциональную избыточности [2]. Для гибкого восстановления необходимо сформировать множество средств восстановления.

Целью данной статьи является раскрытие возможностей применения метода сигнальных подстроек для обеспечения отказоустойчивости микробеспилотных летательных аппаратов.

Сигнальную подстройку используют для формирования дополнительного управляющего воздействия $U_g(k)$ на СУ МБПЛА, устраняющего последствия компенсируемых видов отказов в целях восстановления ее работоспособности. При организации сигнальной подстройки в конструкции СУ должна быть предусмотрена возможность подачи дополнительного управляющего воздействия $U_g(k)$. В общем случае компенсируемый отказ приводит к изменению вектора состояния системы и выходного сигнала, а также матриц математической модели.

Опишем эту ситуацию следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} &\widetilde{x}(k+1) = \left[A + \Delta A(\gamma_i)\right]\widetilde{x}(k) + \\ &+ [B + \Delta B(\gamma_i)][U(k) + U_g(k)]; \\ &\widetilde{Y}(k) C\widetilde{x}(k); \quad i = \overline{1, \mu}; \quad \Delta x(k_0) = \widetilde{x}_0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Delta A(\gamma_i)$ и $\Delta B(\gamma_i)$ – приращения соответствующих матриц системы, вызванные появлением отказа, характеризуемого параметром γ_i. В целях упрощения дальнейшего изложения предположим, что матрица C – диагональная, единичная, а $\dim C = (n*n)$.

При использовании фильтра Люенбергера для воспроизведения сигналов системы, соответствующих режиму её нормального функционирования, отклонения сигналов описываются диагностической BL-моделью следующего вида [2]:

$$\begin{aligned} &\Delta x(k+1) = G\Delta x(k) + BU_g(k) + \\ &+ \Delta A(\gamma_i)\widetilde{x}(k) + \Delta B(\gamma_i)[U(k) + U_g(k)]. \end{aligned} \tag{2}$$

Рассмотрим эту диагностическую модель с позиции динамических систем. Отклонения сигналов $\Delta x(k)$ и $\Delta y(k)$ вызваны суммой таких слагаемых: $\Delta A(\gamma_i)x(k) + \Delta B(\gamma_i)[U(k)+U_g(k)]$, которую можно интерпретировать как параметрические возмущения, действующие на динамическую систему (2). Для компенсации этих возмущений необходимо сформировать соответствующее воздействие $U_g(k)$. Параметрические возмущения системы представим соответствующими эквивалентными начальными условиями, и, преобразовав уравнение, получим такое описание динамики отклонений в системе:

$$\begin{aligned} &\Delta Y(k+1) = G\Delta Y(k) + BU_g(k); \\ &\Delta Y(k) \in \Omega_{\Delta Y}, \end{aligned} \tag{3}$$

где $\Omega_{\Delta Y}$ – множество точек односвязной конечной области пространства состояния системы, содержащее в себе начало координат и некоторую её конечную окрестность.

Воздействия $U_g(k)$ синтезируем с помощью дискретного аналога второго метода Ляпунова [3], позволяющего получать условия асимптотической устойчивости в некоторой области или в целом при появлении компенсируемых отказов d системе. Второй (или прямой) метод Ляпунова сводится к построению специальной вспомогательной скалярной функции, называемой функцией Ляпунова $V[\Delta Y(k)]$, и изучению её свойств, а также свойств её первой разности $\Delta V[k, k+1]$, определенной вдоль траектории системы (3).

Функцию $V[\Delta Y(k)]$ назовём определенно положительной в области $\Omega_{\Delta Y}$, если всюду в этой области, кроме точки начала координат, выполняется неравенство $V[\Delta Y(k)]>0$. При выполнении неравенства $V[.] <0$ функцию $V[.]$ называют определенно отрицательной. В общем, такие функции называют знакоопределёнными.

Приведём основные результаты теории устойчивости, которые будут использоваться в дальнейшем.

Линейная дискретная система асимптотически устойчива, когда все корни δj (характеристические числа) матрицы G лежат внутри единичного круга, т.е. $|\delta_j| < 1$, $i = \overline{1, n}$. Если для системы (3) в некоторой области $\Omega_{\Delta Y}$ существует определенно положительная функция $V[\Delta Y(k)]$, первая разность которой $\Delta V[k, k+1]$, вычисленная в силу системы, будет определенно отрицательной, то положение равновесия будет асимптотически устойчивым, т.е.

$$\lim_{k \to \infty} \Delta Y(k) = 0.$$

Рассмотрим метод получения достаточных условий сигнальной компенсации отклонений $\Delta Y(k)$, вызванных отказами, а также алгоритмов подстройки с помощью аппарата функций Ляпунова. Следовательно, качество сигнальной компенсации отказов оценим с помощью функций вида

$$V[\Delta Y(k)] = \Delta Y^T(k) Q \Delta Y(k), \tag{4}$$

где $Q = Q^T > 0$.

Такая функция является определённо положительной в области $\Omega_{\Delta Y}$, следовательно, удовлетворяет требованиям функций Ляпунова.

Будем синтезировать алгоритм подстройки для системы со скалярным уравнением

$$\Delta Y(k) = G\Delta Y(k) + bU_{g1}(k); \Delta Y(k) \in \Omega_{\Delta Y},$$

где b – n-мерный вектор-столбец; $U_{g1}(k)$ – скалярное управляющее воздействие.

В результате преобразований получена первая разность функции Ляпунова:

$$\begin{aligned} \Delta V[k,k+1] &= Y^T(k)[G^T QG - Q]\Delta Y(k) + \\ &+ 2\Delta Y^T(k)G^T QbU_{g1}(k) + b^T QbU_{g1}^2(k). \end{aligned} \tag{5}$$

Управляющее воздействие $U_{g1}(k)$ выберем из условия обеспечения в области $\Omega_{\Delta Y}$ для конечной разности $\Delta V[k, k+1]$ (5) выполнения неравенства $\Delta V[k, k+1] < 0$, т.е. условия определенной отрицательности функции. Функция (5) будет определенно отрицательной при выполнении таких условий:

$$G^T QG - Q = -P, \quad \text{где } P = P^T > 0;$$

$$2\Delta Y^T(k)G^T QbU_{g1}(k) + b^T QbU_{g1}^2(k) = 0.$$

Для выполнения первого условия необходимо задать диагональную квадратную положительную матрицу P и вычислить матрицу Q, удовлетворяющую требованию $Q = Q^T > 0$. Выполнение второго условия связано с выбором $U_{g1}(k)$, обеспечивающим нулевое значение суммы двух слагаемых в области $\Omega_{\Delta Y}$. Разрешив второе равенство относительно скалярной функции $U_{g1}(k)$, получим два значения:

$$\begin{aligned} &1)\, U_{g1}(k) = 0; \\ &2)\, U_{g1}(k) = -(b^T Qb)^{-1} 2\Delta Y^T(k)G^T Qb. \end{aligned} \tag{6}$$

Первое решение – тривиальное и физически неприемлемое. Второе решение представляет собой алгоритм формирования управляющего скалярного воздействия, обеспечивающего асимптотическую устойчивость относительно значения $\Delta Y(K) = 0$ в области $\Omega_{\Delta Y}$. Другими словами, алгоритм (6) обеспечивает компенсацию отказов, т.е. отказоустойчивость СУ МБЛА относительно компенсируемых отказов [4].

Убедиться в свойствах управляющего воздействия можно путем подстановки выражения для $U_{g1}(k)$ в систему (3). После соответствующих преобразований получим, что

$$\Delta Y(k+1) = \left[G - 2\frac{bb^T QG}{b^T Qb} \right] \Delta Y(k).$$

Рассмотрим простейший более наглядный случай, когда вектор b имеет h-ю ненулевую компоненту.

Матрица $G = \delta I$, причём $|\delta|<1$, т.е. корни матрицы G лежат внутри единичного круга. Тогда все корни новой матрицы, кроме n-го, будут равны – δ, а последний n-й корень равен δ. Так как δ удовлетворяет условию $|\delta|<1$, то все корни новой матрицы лежат внутри единичного круга, а, следовательно, такая система асимптотически устойчива.

При алгоритме управления (6) для динамической системы (3) справедлива суммарная оценка качества отказоустойчивости:

$$\begin{gathered} \sum_{k=k_0}^{\infty} \Delta Y^T(k)P\Delta Y(k) \le \Delta Y^T(k_0)Q\Delta Y_0(k), \\ \forall \Delta Y(k_0) \in \Omega_{\Delta Y}. \end{gathered} \tag{7}$$

Для обеспечения определенной отрицательности конечной разности $\Delta V[k, k+1]$ описанное условие – не единственно возможное достаточное условие. Возможны и другие условия, обеспечивающие $\Delta V[k, k+1] < 0$, а? следовательно, и другие алгоритмы сигнальной компенсации отклонений $\Delta Y(k)$.

Пример. Построим алгоритм сигнальной подстройки для одного из элементов СУ МБПЛА – сервопривода, описываемого уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k+1) \\ \tilde{x}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ -\dfrac{T_0 K_2 \tilde{K}_c}{T_{pm}} & 1 - \dfrac{T_0}{T_{pm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{T_0 K_1 \tilde{K}_c}{T_{pm}} \end{bmatrix} [U_3(k) + U_g(k)];$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_n(k) \\ \tilde{U}'_n(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \end{bmatrix}.$$

Эквивалентная диагностическая модель (3) для сервопривода примет такой вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_n(k+1) \\ \Delta U'_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_n(k) \\ \Delta U'_n(k) \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{T_0 K_1 K_c}{T_{pm}} \end{bmatrix} U_g(k).$$

Так как матрица G диагональная квадратная с корнями, равными δ, причём такими, что $|\delta|<1$, то выбор матрицы Q с диагональными положительными элементами q_{11} и q_{12} гарантирует определение матрицы P. Выполнив все действия в соответствии с выражением (6), получим алгоритм

$$U_{g1}(k) = -\frac{2\delta \Delta U'_n(k)}{b_2},$$

обеспечивающий асимптотическую устойчивость сервопривода относительно нормального режима функционирования в условиях появления компенсируемых отказов в любом функциональном элементе. Чтобы убедиться в этом, подставим в модель для отклонений выражение $U_{g1}(k)$. После преобразования получим уравнение автономной системы, в которой матрица имеет два корня δ и $-\delta$. Так как $|\delta|<1$, то это свидетельствует об асимптотической устойчивости сервопривода с контуром сигнальной подстройки, обеспечивающим $\lim \Delta U_n'(k) = 0$ при $k \to \infty$.

Рассмотренный метод синтеза скалярных компенсирующих сигнальных воздействий применим и в случае необходимости формирования векторных дополнительных управлений $U_g(k)$. При этом необходимо поступать следующим образом. Приравнять все компоненты вектора $U_{g1}(k)$, кроме первой $U_g(k)$, нулю. В соответствии с изложенной методикой формируют для такой системы управление $U_{g1}(k)$, обеспечивающее асимптотическую устойчивость. Подставив в исходную систему (3) выражение для $U_{g1}(k)$ (6), получают выражение системы для вектора управления с оставшимися компонентами. Аналогичным образом находят выражения для компоненты $U_{g2}(k)$ и т.д. до тех пор, пока не будут определены все компоненты вектора $U_g(k)$.

Заключение

Таким образом, алгоритмы сигнальной подстройки, синтезированные с помощью дискретного аналога второго метода Ляпунова, позволяют обеспечить отказоустойчивость системы управления МБЛА с заданным по критерию (4) качеством по отношению к компенсируемым отказам из заданного множества. Это позволит системно подойти к вопросу обеспечения отказоустойчивости СУ МБЛА.

Литература

1. Кулік А.С., Нарожний В.В., Пунєгов С.Ю., Таран О.М., Лавошник І.В. Концепція мікромініатюрних безпілотних літальних апаратів // Науково-практична конференція „Сучасний стан і перспективи розробки, виробництва і застосування безпілотних літальних апаратів в Україні”. – К., 2004. – С. 29.

2. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ». – Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

3. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления. – Х.: ХАИ, 1991. – 91 с.

4. Кулик А.С., Нарожный В.В., Комков А.В. Состояние и перспективы развития малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сборник трудов X Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Самарский гос. аэрокосм. ун-т, 2002. – С. 228 – 232.

Поступила в редакцию 17.08.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.М. Любчик, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.